

Bacterias Rizosféricas y Endófitas con Potencial PGPB Aisladas del Cultivo de Maíz (*Zea mays* L.) en Chiapas, México Rhizospheric and Endophytic Bacteria with PGPB Potential Isolated from Maize Crop (*Zea mays* L.) in Chiapas, Mexico

Adriana Gen-Jiménez¹ , Erick Fabián Sarmiento-Megchum¹ ,
Julio César Maldonado-Gómez¹ , Luis Alberto Manzano-Gómez^{1,2} ,
Stephanie Solis-Zebadúa¹ , Clara Ivette Rincón-Molina¹ y Reiner Rincón-Rosales^{1†}

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Laboratorio de Ecología Genómica y Agricultura Regenerativa. Carretera Panamericana km 1080, Boulevares. 29050. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México; (A.G.J.), (E.F.S.M.), (J.C.M.G.), (L.A.M.G.), (S.S.Z.), (C.I.R.M.), (R.R.R.).

[†] Autor para correspondencia: reiner.rr@tuxtla.tecnm.mx

² 3R Biotec S.A. de C.V., Departamento de Investigación y Desarrollo. Colonia Centro, 233. 29000 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México; (L.A.M.G.).

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo de gran importancia agrícola y socioeconómica a nivel mundial. La búsqueda y aplicación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) representa una estrategia sostenible para mejorar la productividad agrícola. El objetivo de este estudio fue identificar y caracterizar cepas bacterianas rizosféricas y endófitas con potencial PGPB asociadas al maíz en suelos de Chiapas, México, mediante el uso de técnicas moleculares y pruebas *in vitro*. Se evaluó la capacidad de cada cepa para la fijación de nitrógeno, solubilización de fosfatos y producción de sideróforos. La diversidad genética de las cepas se determinó mediante huellas genómicas ERIC-PCR, y su identidad fue confirmada por secuenciación del gen 16S rRNA. Se aislaron un total de 46 cepas, las cuales fueron agrupadas en 26 patrones genómicos. Los resultados obtenidos mostraron que los aislados pertenecen a los géneros *Klebsiella*, *Acinetobacter* y *Pseudomonas*, seguidos por *Pseudacidovorax*, *Stenotrophomonas* y *Ochrobactrum*. El género *Klebsiella* presentó una notable capacidad para la solubilización de fósforo, producción de sideróforos y fijación de nitrógeno. Las condiciones específicas del campo de estudio jugaron un papel crucial en la obtención de microorganismos de interés benéfico. Estos hallazgos resaltan el potencial de las bacterias rizosféricas y endófitas aisladas del maíz como una fuente prometedora para la identificación de microorganismos con posibles aplicaciones biotecnológicas y contribuir en mejorar la sostenibilidad y productividad de los cultivos.

Palabras clave: 16SrRNA, crecimiento vegetal, ecología microbiana, microorganismos benéficos.

SUMMARY

Maize (*Zea mays* L.) is a crop of significant agricultural and socio-economic importance worldwide. The search for and application of plant growth-promoting bacteria (PGPB) represent a sustainable strategy to enhance agricultural productivity. This study aimed to identify and characterize rhizospheric and endophytic bacterial strains with PGPB potential associated with maize in soils from Chiapas, Mexico, using molecular techniques and *in vitro* assays. The nitrogen-fixing ability, phosphate solubilization, and siderophore production of each strain were evaluated. Genetic diversity was assessed using ERIC-PCR genomic fingerprinting, and strain identity was confirmed through 16S rRNA gene sequencing. A total of 46 strains were isolated and grouped into 26 genomic patterns. The isolates belonged to the genera *Klebsiella*,



Cita recomendada:

Gen-Jiménez, A., Sarmiento-Megchum, E. F., Maldonado-Gómez, J. C., Manzano-Gómez, L. A., Solis-Zebadúa, S., Rincón-Molina, C. I., & Rincón-Rosales, R. (2025). Bacterias Rizosféricas y Endófitas con Potencial PGPB Aisladas del Cultivo de Maíz (*Zea mays* L.) en Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-14. e2002. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2002>

Recibido: 19 de junio de 2024.
Aceptado: 12 de diciembre de 2024.
Artículo. Volumen 43.
Marzo de 2025.

Editor de Sección:
Dr. Victor Manuel Ruiz Valdiviezo



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Acinetobacter, and *Pseudomonas*, followed by *Pseudacidovorax*, *Stenotrophomonas*, and *Ochrobactrum*. The *Klebsiella* genus exhibited notable capacities for phosphate solubilization, siderophore production, and nitrogen fixation. The specific conditions of the study site played a crucial role in obtaining beneficial microorganisms. These findings highlight the potential of rhizospheric and endophytic bacteria isolated from maize as promising sources for identifying microorganisms with biotechnological applications, contributing to improved crop sustainability and productivity.

Index words: 16S rRNA, plant growth, microbial ecology, beneficial microorganisms.

INTRODUCCIÓN

La interacción entre el suelo, las plantas y los microorganismos es un componente esencial para la sostenibilidad y productividad agrícola. Las bacterias benéficas que habitan la rizosfera y la endosfera de las plantas desempeñan un papel importante en la promoción del crecimiento vegetal al ser utilizadas como bioestimulantes. Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB, por sus siglas en inglés) son microorganismos que inciden en el metabolismo vegetal mejorando la disponibilidad de nutrientes, incrementan la fertilidad de los suelos agrícolas y favoreciendo el crecimiento y rendimiento de las plantas. Estas bacterias incluyen géneros como *Klebsiella*, *Acinetobacter*, *Bacillus* y *Pseudomonas*, los cuales han demostrado tener un potencial significativo como promotores del crecimiento de plantas (De Souza, Ambrosini y Passaglia, 2015).

Las PGPB emplean una amplia gama de mecanismos de acción, entre ellos se incluye la fijación de nitrógeno, la solubilización de fósforo, la producción de reguladores de crecimiento o la liberación de hormonas como auxinas y citoquininas (Ramakrishna, Yadav y Li, 2019). Estas funciones microbianas no solo mejoran la nutrición de las plantas, sino que también aumentan la calidad y fertilidad del suelo, promoviendo un ecosistema agrícola más saludable y productivo. Se ha descubierto que la aplicación de cepas PGPB puede incidir en el crecimiento y rendimiento de cultivos, además, ayuda a reducir la dependencia de fertilizantes químicos, contribuyendo a prácticas agrícolas sostenibles (Kong *et al.*, 2019).

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial y México es reconocido como su centro de origen y diversificación. Las razas criollas de maíz en México no solo tienen una gran importancia económica, sino también social y agrícola, debido a su adaptabilidad y resistencia a diversas condiciones ambientales. La aplicación de biofertilizantes formulados a partir de PGPB en cultivos de maíz ha mostrado efectos significativamente positivos, incluyendo el incremento en el rendimiento del cultivo, la mejora en la calidad del suelo, y la protección de las plantas contra daños ocasionados por la salinidad. Estudios recientes han destacado el impacto beneficioso de cepas bacterianas específicas en el crecimiento y la productividad del maíz (Rodríguez-Hernández *et al.*, 2019).

Las técnicas moleculares avanzadas, como la amplificación del gen 16S rRNA y huellas genómicas ERIC-PCR (Enterobacterial Repetitive Intergenic Consensus), han permitido una identificación más precisa y una comprensión más profunda de las bacterias PGPB. Estas tecnologías han facilitado el aislamiento y caracterización de cepas bacterianas con alto potencial biofertilizante, desempeñando un papel fundamental en la mejora de la productividad agrícola y en la sostenibilidad de los sistemas agroecológicos (Gamalero, Bona y Glick, 2022).

El objetivo de este trabajo fue identificar taxonómicamente cepas bacterianas rizosféricas y endofíticas fijadoras de nitrógeno asociadas al cultivo de maíz mediante el uso del gen 16S rRNA y huellas genómicas ERIC-PCR y evaluar sus cualidades de promoción de crecimiento vegetal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental y Caracterización Físicoquímica del Suelo Agrícola

Muestras de suelo agrícola a granel (suelo inicial sin planta) se obtuvieron en septiembre de 2023 en la parcela ubicada en el Ejido Palo Alto, municipio de Berriozábal, Chiapas, a 1100 m de altitud y con coordenadas geográficas de 16° 48' 16.1" N, 93° 22' 13.0" O según el USGS (2024). El sitio experimental presenta un clima cálido subhúmedo (Awo) a cálido húmedo (Am), con un rango de temperatura que oscila entre 22 y 28 °C y, con

un rango de precipitación de 900 a 2000 mm (INEGI, 2021). El muestreo de suelo se llevó a cabo con la finalidad de realizar determinaciones fisicoquímicas para conocer el estado inicial del sitio experimental. Las muestras de suelo a granel se recolectaron a una profundidad de 0-30 cm, seleccionando cinco puntos aleatorios distribuidos en la parcela, con el objetivo de asegurar que la muestra obtenida fuera representativa de toda la extensión de la parcela (Mendoza y Espinoza, 2017). El pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la temperatura se determinaron *in situ* utilizando un medidor multiparamétrico portátil HANNA® modelo HI-9828 (HANNA Instruments, Limena, Italy). (Rincón-Molina *et al.*, 2019). La materia orgánica y el nitrógeno total se determinaron con un analizador elemental Flash 2000 (Thermo Scientific®, USA). El fósforo total se determinó con el método de solubilización de $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$.

Obtención de Suelo Rizosférico y Granos de Maíz

Para la obtención de muestras de suelo rizosférico de plantas de maíz, se realizó inicialmente la colecta de las plantas. El diseño de muestreo empleado fue un muestreo aleatorio simple, mediante el cual se seleccionaron cinco plantas completas, incluyendo las raíces, siguiendo la metodología de extracción descrita por Schafer, Hallett y Johnson (2014). Estas plantas se ubicaron en cinco puntos seleccionados al azar dentro de un área mínima en la parcela experimental. Las raíces fueron agitadas vigorosamente para eliminar el suelo a granel y, posteriormente, se limpió cuidadosamente la fina capa de suelo adherida a la superficie radicular utilizando una brocha estéril, según lo recomendado por Clemmensson-Lindell y Persson (1992).

Para la obtención de granos de maíz, se seleccionaron 10 mazorcas de forma aleatoria de las mismas plantas utilizadas para las muestras de suelo rizosférico. Las mazorcas fueron transportadas al laboratorio en hieleras para preservar su integridad. Los granos se extrajeron utilizando pinzas de disección estériles, seleccionando cinco granos al azar de cada mazorca, lo que resultó en un total de 50 granos. El proceso de extracción se realizó con extremo cuidado, asegurando que el pedicelo de los granos no sufriera fracturas, a fin de evitar la entrada de agentes de desinfección al interior del grano.

Aislamiento y Cultivo de Bacterias

Se llevó a cabo el aislamiento de bacterias asociadas a la rizosfera y endófitas. Para el procesamiento de las muestras de suelo rizosférico, se pesó 1.0 g de muestra de suelo, se colocó en un matraz que contenía 100 mL de H_2O destilada estéril y se dejó en agitación a 120 rpm durante 24 h. Se realizaron diluciones seriadas de las muestras en tubos de ensayo hasta una dilución de 10^{-7} . Alícuotas de 100 μL de las diluciones 10^{-5} a 10^{-7} fueron inoculadas en tubos de ensayo que contenían medio NFb semisólido pH 6.8 (Baldani *et al.*, 2014) y, tubos con medio nutritivo semisólido (3.0 g L^{-1} de extracto de carne, 5.0 g L^{-1} de peptona de gelatina, 5.0 g L^{-1} de agar bacteriológico). Los tubos se incubaron a 30 °C de 3 a 5 días.

Con respecto al aislamiento de endófitos, los granos de maíz se desinfectaron durante 5 min con etanol (70%) y después con hipoclorito de sodio (1.5%) durante 10 min, seguidos de lavados con agua destilada estéril (Rincón-Molina *et al.*, 2022). Para determinar la efectividad del método de desinfección, se tomaron alícuotas de 100 μL del agua utilizada en el último lavado y se inocularon en placas con medio PY- Ca^{2+} (5.0 g L^{-1} de peptona de caseína, 10 mL L^{-1} de 0.94 M CaCl_2 y, 3.0 g L^{-1} de extracto de levadura pH 6.8) a 30 °C por 72 h (Rincón-Rosales, Lloret, Ponce y Martínez, 2009). Los granos de maíz fueron macerados en morteros esterilizados previamente y las muestras fueron inoculadas en tubos de ensayo que contenían medio NFb semisólido y tubos con medio nutritivo semisólido, se incubaron a 30 °C de 3 a 5 días.

Posteriormente, se analizó el cambio de coloración y crecimiento bacteriano. Los tubos que presentaron cambio de coloración fueron inoculados en placas con medio NFb para comprobar el crecimiento de bacterias fijadoras de nitrógeno (Baldani *et al.*, 2014). Las placas se incubaron a 30 °C durante 72 h. Las colonias crecidas en cajas que presentaron cambio de coloración fueron trasladadas a medio PY- Ca^{2+} hasta su purificación.

La morfología celular de las cepas aisladas de las muestras de rizosfera y endófitas fue examinada por microscopía de luz visible (Zeiss® PS7, Alemania). Se determinó la reacción Gram utilizando un kit comercial (Merck®, Alemania), de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

Identificación Molecular de Cepas Bacterianas

Se realizó la extracción de ADN total bacteriano para cada cepa obtenida utilizando el kit comercial DNA Isolation Kit for Cells and Tissues (Roche®) siguiendo las especificaciones del fabricante (López-Fuentes *et al.*, 2012). La calidad y cantidad del ADN extraído se verificaron mediante electroforesis en gel de agarosa al 1% y con el espectrofotómetro UV-Vis de microvolumen NanoDrop One de Thermo Scientific®.

Utilizando el ADN total de cada cepa bacteriana, se obtuvieron patrones moleculares con la técnica de reacción en cadena de polimerasa de secuencias consenso repetitivas intergénicas de enterobacterias (ERIC-PCR, por sus siglas en inglés), utilizando los cebadores ERIC1 y ERIC2, como se describe en Versalovic, Koeuth y Lupski (1991). Los patrones genómicos se identificaron después de la separación de los productos de PCR por electroforesis en gel de agarosa al 1.5% y se analizaron con el software GelCompar II (Applied Maths®). Los índices de riqueza (*d*) y diversidad (*H*) (índice de Shannon-Weaver) se calcularon con base en el número total de bacterias aisladas de la rizosfera y de tejidos vegetales de las plantas de maíz con respecto a los patrones genómicos obtenidos (Pereira, Nesci y Etcheverry, 2009).

Se llevó a cabo la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés) para amplificar el gen 16S rRNA con la ayuda del kit comercial HIGH Pure PCR Template Preparation Kit (Roche®). Se utilizaron los cebadores universales 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') y 1492R (5'-TACGG- YTACCTTGTTACGACTT-3'). El protocolo de amplificación fue de acuerdo con lo comentado por Rincón-Molina *et al.* (2020).

Los productos de PCR fueron purificados y secuenciados en Macrogen® (Seúl, Corea). Las secuencias se editaron con el programa Bioedit Sequence Alignment Editor®. Todas las secuencias se compararon utilizando la herramienta de análisis BLAST de la base de datos del Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI, por sus siglas en inglés) (Rincón-Molina *et al.*, 2022).

Pruebas PGPB

Se realizaron pruebas para evaluar la capacidad de las cepas bacterianas aisladas como promotoras del crecimiento vegetal, centrándose en su capacidad para la fijación de nitrógeno, la solubilización de fosfato y la producción de sideróforos.

Para la prueba de reducción de acetileno, que se realiza para evaluar la capacidad de las cepas bacterianas de fijar nitrógeno, se inocularon viales con medio mínimo libre de nitrógeno con cada una de las cepas obtenidas. Se empleó un inóculo bacteriano del género *Klebsiella* spp. como control positivo y se incubaron durante 24 h a 35 °C. Posteriormente, se preparó un vial con carburo de calcio, al que se le inyectó 0.1 mL de agua milli-Q® para inducir la reacción exotérmica y producir gas acetileno. A los viales inoculados se les retiró 0.4 mL de aire con una jeringa para inyectar el gas acetileno, seguido de una incubación adicional de 24 horas a 35 °C. La reducción de acetileno a etileno, un indicador indirecto de la actividad de fijación de nitrógeno, fue medida mediante cromatografía de gases utilizando un cromatógrafo de gases Varian® 3300 (Rincón-Molina *et al.*, 2020).

La evaluación cualitativa para la solubilización de fosfato inorgánico se evaluó en placas con medio de crecimiento enriquecido con fosfato tricálcico [Ca₃(PO₄)₂] como fuente de fósforo, según lo descrito por Gen-Jiménez *et al.*, (2023). Las colonias bacterianas solubilizadoras de fósforo fueron reconocidas por la presencia de halos después de haber sido incubadas a 28 °C durante 3 a 5 días.

La capacidad de producir sideróforos se determinó cualitativamente a partir del ensayo CAS-agar (Schwyn y Neilands, 1987). Se inoculó cada cepa y se incubó de 3 a 5 días a 28 °C. La formación de halos amarillos-anaranjados alrededor de las colonias indicaron la capacidad para producir sideróforos (Rincón-Molina *et al.*, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis fisicoquímico de las muestras de suelo a granel obtenidas de la parcela experimental mostró un pH de 7.71±0.22, una baja CE (0.113±0.26 dS m⁻¹), un valor alto de CIC (52.79±1.54 Cmol kg⁻¹). Se determinó una moderada cantidad de materia orgánica (8.19±0.16%). Por otra parte, la cantidad de nitrógeno total (0.42±1.7%), fósforo disponible (6.81±1.8 mg kg⁻¹) y potasio disponible (0.42±0.02 Cmol kg⁻¹) se encontró en muy bajas cantidades. Adicionalmente, se determinó que el suelo a granel está compuesto en un 14.2% de arena, 65.8% de arcilla y 20% de limo. Diferentes estudios han demostrado que los suelos agrícolas en Chiapas presentan variaciones significativas en sus propiedades fisicoquímicas dependiendo del uso del suelo y la topografía. Por ejemplo, en los Altos de Chiapas, los suelos presentan una baja disponibilidad de nutrientes y una tendencia hacia la acidez (León-Nájera, Gómez, Hernández y Alvarez, 2006; Martínez-Soto, Yañez, Cantú, González y Marmolejo, 2022). Un pH de 7.71 señala que el suelo es moderadamente alcalino, lo que puede limitar la disponibilidad de

micronutrientes clave para el desarrollo de las plantas, como el hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y cobre (Cu) (Gupta, Kening y Liang, 2008). En suelos alcalinos, la presencia de metales como el aluminio (Al) y el hierro (Fe) puede estar limitada, lo que afecta la absorción de estos nutrientes por las plantas (Riaz *et al.*, 2020; Martínez-Soto *et al.*, 2022). El elevado valor de CIC identificado en este estudio indica una gran capacidad del suelo para retener nutrientes, lo que representa un factor favorable para su fertilidad. Un valor alto de CIC se asocia típicamente con una mayor presencia de arcilla, componentes que aumentan la capacidad del suelo para retener cationes esenciales como el calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) (Yang *et al.*, 2024). Un pH ligeramente alcalino puede limitar la disponibilidad de ciertos micronutrientes, pero esto no necesariamente contradice los beneficios de una alta CIC. En suelos con alta CIC, los macronutrientes esenciales suelen estar más disponibles. La menor disponibilidad de micronutrientes puede corregirse mediante prácticas de manejo adecuadas, como la adición de quelatos de hierro o el uso responsable de fertilizantes específicos (Osman, 2013; Havlin, 2020). Es importante señalar que la materia orgánica es crucial para la fertilidad del suelo y la salud de los cultivos. El contenido moderado de materia orgánica en el suelo de la parcela experimental es un indicador positivo para el cultivo de maíz, ya que sugiere que el suelo tiene buena retención de agua y de nutrientes, lo que es crucial para el crecimiento saludable de las plantas, especialmente en condiciones de cultivo intensivo (Fageria, 2012; Ankenbauer y Loheide, 2017; Minasny y McBratney, 2018; Lal, 2020). Por otro lado, es importante considerar la disponibilidad de otros nutrientes esenciales como el nitrógeno, fósforo y potasio, que se encontraron en bajas cantidades en el análisis del suelo. El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, involucrado en la síntesis de proteínas y la fotosíntesis (Fathi, 2022). La baja cantidad de nitrógeno total en el suelo puede estar relacionada con una mineralización deficiente de la materia orgánica, un proceso clave que libera nitrógeno disponible para las plantas. Esta deficiencia en la mineralización podría deberse a condiciones ambientales no óptimas, como temperatura, humedad o niveles de oxígeno inadecuados, así como a una baja actividad microbiana, lo que limita la descomposición de la materia orgánica y, por tanto, la liberación de nitrógeno (Ma *et al.*, 2020; Kirsten *et al.*, 2021). De igual manera, el fósforo es vital para la transferencia de energía en las plantas y el desarrollo de las raíces (Fathi y Afra, 2023). La baja cantidad de fósforo disponible puede deberse a la inmovilización en suelos arcillosos. Estudios indican que estos suelos tienen la capacidad de fijar fósforo, formando compuestos insolubles que las plantas no pueden absorber (Islam *et al.*, 2024). En cuanto a la baja cantidad de potasio disponible en el suelo de acuerdo con el análisis realizado en este estudio, puede deberse a la continua extracción de este nutriente por cultivos anteriores sin una adecuada reposición mediante fertilización. En Chiapas, se ha documentado que muchos suelos presentan bajas concentraciones de potasio intercambiable, lo que puede afectar negativamente el rendimiento del maíz (Gómez *et al.*, 2022). Además, en suelos con alta CIC, el potasio puede competir con otros cationes, como calcio y magnesio, por los sitios de adsorción en las partículas de arcilla, reduciendo su disponibilidad para las plantas (Appel, Ma, Rhue y Reve, 2003; Rakhsh, Golchin, Al Agha y Alamdari, 2017). Esta competencia, junto con posibles procesos de lixiviación en suelos arcillosos, puede limitar la cantidad de potasio accesible para el crecimiento óptimo de los cultivos.

El análisis fisicoquímico del suelo de la parcela experimental revela que, según las cantidades de materia orgánica y la CIC, existe un buen potencial para la retención de nutrientes y agua, pero las bajas cantidades de nitrógeno total, fósforo y potasio disponibles indican deficiencias significativas que limitarían la fertilidad del suelo y, en consecuencia, la productividad del cultivo de maíz. El pH ligeramente alcalino puede reducir la disponibilidad de ciertos micronutrientes esenciales, complicando aún más la situación nutricional del suelo. En suelos arcillosos como el estudiado, que tienen una alta capacidad de retención de nutrientes, pero también una tendencia a inmovilizar fósforo es crucial implementar prácticas de manejo que incluyan la adición de insumos agrícolas específicos para corregir estas deficiencias. Por lo tanto, aunque el suelo tiene un buen potencial debido a su estructura y capacidad de retención, requiere un manejo cuidadoso y la suplementación adecuada de nutrientes esenciales para mejorar su fertilidad y optimizar su capacidad para soportar un cultivo de maíz productivo.

La investigación de microorganismos de la rizosfera y endófitos de una amplia diversidad de plantas, especialmente con potencial como PGPB, ha cobrado relevancia en los últimos años, dado su potencial para mejorar la productividad agrícola de manera sostenible (Rincón-Molina *et al.*, 2020; Saad, Kandil y Mohammed, 2020; Ercole *et al.*, 2021; Fernández *et al.*, 2023; Agunbiade, Fadiji, Agbodjato y Babalola, 2024). En este estudio, se aislaron y cultivaron microorganismos de la rizosfera y tejidos vegetales de maíz con el objetivo de identificar cepas con cualidades probióticas vegetales. Un total de 46 cepas bacterianas fueron aisladas de cultivos de maíz, usando medio de cultivo NFb y medio nutritivo, con la finalidad de aislar bacterias fijadoras de nitrógeno. De los aislados bacterianos, 28 cepas pertenecieron a la rizosfera (Cuadro 1) y 18 cepas endófitas fueron aisladas de los granos de maíz (Cuadro 2). En relación con los aspectos fenotípicos, los aislados presentaban morfología

Cuadro 1. Abundancia relativa (%) según la clasificación de grupos ERIC en rizósfera.
Table 1. Relative abundance (%) according to ERIC group classification in rhizosphere.

Grupo	Rizósfera	
	Cepa	Abundancia relativa
		%
1	MC1	3.6
2	MC2	3.6
3	MC3	3.6
4	MC4, MC24	7.1
5	MC5, MC17	7.1
6	MC6, MC7	7.1
7	MC9	3.6
8	MC11, MC19	7.1
9	MC12	3.6
10	MC13, MC27, MC28	10.7
11	MC14	3.6
12	MC15	3.6
13	MC16-A, MC16-B	7.1
14	MC18	3.6
15	MC20, MC22	7.1
16	MC21, MC26	7.1
17	MC23-A	3.6
18	MC25	3.6
19	MC23-B	3.6
Total de cepas	28	100

Cuadro 2. Abundancia relativa (%) según la clasificación de grupos ERIC de endófitos.
Table 2. Relative abundance (%) according to ERIC group classification of endophytes.

Grupo	Endófitos	
	Cepa	Abundancia relativa
		%
1	F1A, F1B, F4A, F5A, F6B	27.8
2	F2B, F3A, F3B, F4C, F5B, N5A, N5B	38.9
3	F3AR, F3BR	11.1
4	F4B	5.6
5	F6A	5.6
6	F7B	5.6
7	N4	5.6
Total de cepas	18	100

celular correspondiente a bacilos, cocos y cocobacilos. Dentro de los aislados, las bacterias gram negativas se encontraron en mayoría. En cuanto al aspecto y color, las cepas aisladas tuvieron aspecto seco a mucoso y presentaron coloración blanca, amarilla y crema. La eficacia del medio NFb en la selección de bacterias promotoras del crecimiento vegetal ha sido ampliamente documentada en la literatura científica. Investigaciones realizadas han demostrado la eficacia del medio NFb para aislar bacterias diazotróficas de diversos cultivos, incluyendo maíz y otros cereales (Döbereiner, Reis, Paula y Olivares, 1993; Weber *et al.*, 1999). Estos estudios destacan la capacidad del medio para seleccionar cepas bacterianas que no solo fijan nitrógeno, sino que también poseen otros atributos beneficiosos como la producción de fitohormonas y la solubilización de fósforo.

La riqueza y diversidad de aislados bacterianos se determinó con la técnica ERIC-PCR, que, tras obtener el ADN genómico de cepas puras, generó patrones genómicos de diferentes tamaños (Figura 1). Los perfiles genómicos ERIC agruparon a 46 cepas bacterianas aisladas de la rizosfera y tejidos vegetales de las plantas de maíz dentro de 26 grupos diferentes. Los índices de riqueza (d) y diversidad (H) fueron más altos en la rizosfera (d : 5.40, H : 6.60) que en los tejidos vegetales (d : 2.08, H : 3.70). Con respecto a la diferencia entre la cantidad de aislados según la sección de la planta, se ha evidenciado que las zonas más cercanas a las raíces (la rizosfera) o en el interior de estas, habitan una mayor diversidad de bacterias y que pueden colonizar la endosfera (Maldonado Mendoza y Morales Ruíz, 2021).

El análisis de las secuencias del gen 16S rRNA de 22 cepas representativas reveló que los aislados pertenecían a 12 géneros bacterianos. Los géneros bacterianos presentes en la rizosfera son diversos e incluyen especies como *Pseudacidovorax*, *Acinetobacter*, *Massilia*, *Klebsiella*, *Delftia*, *Pseudomonas*, *Ochrobactrum*, *Stenotrophomonas* y *Comamonas*. Muchas de estas especies han sido identificadas como potenciales promotores del crecimiento vegetal (PGPB), exhibiendo capacidades tales como solubilización de fosfato, fijación de nitrógeno, fitorremediación, síntesis de hormonas vegetales y producción de biopelículas (Cuadro 3) (Han *et al.*, 2005;

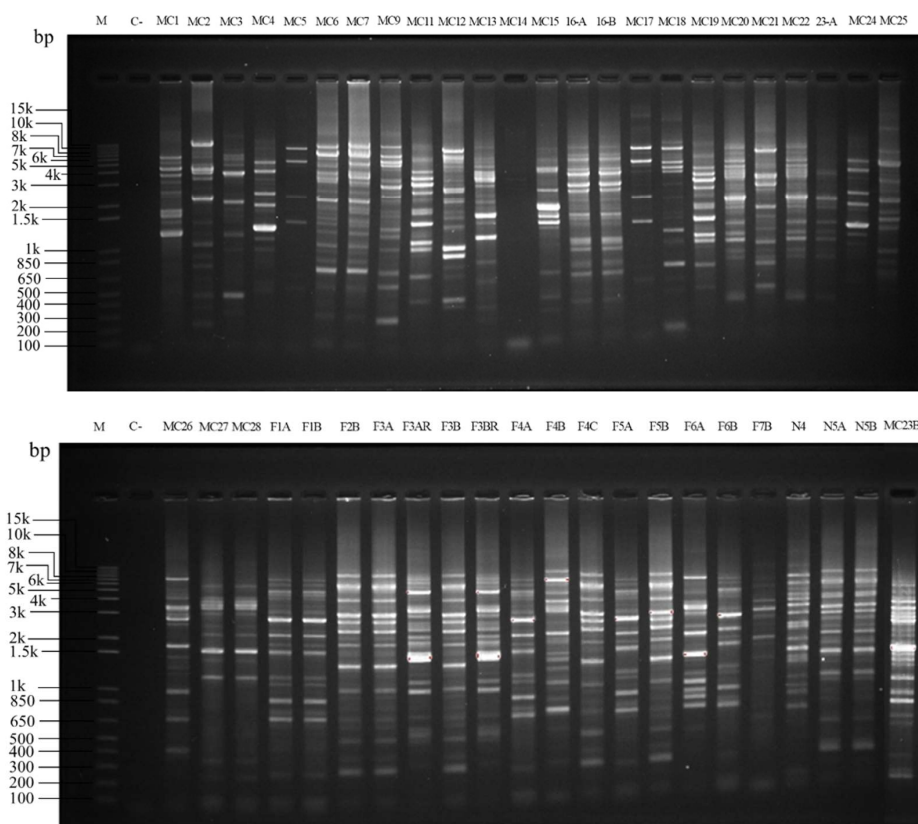


Figura 1. Perfiles genómicos ERIC-PCR obtenidos de cepas aisladas de la rizosfera y granos de maíz.

Figure 1. ERIC-PCR genomic profiles obtained from strains isolated from the maize rhizosphere and grains.

Cuadro 3. Características moleculares de las cepas bacterianas aisladas de cultivo de maíz.
Table 3. Molecular characteristics of bacterial strains isolated from maize cultivation.

Grupo ERIC	Cepa	Especie similar BLAST-NCBI	Similitud genética (%)	Fuente de aislamiento	Cualidades biológicas	Referencia
1	MC1	Pseudacidovorax OsEnb_ALM_A3 intermedius	99.81	Rizosfera	Competente en nodulación con identidad no rizobiana, capaz de secretar IAA, celulasas y proteínas al medio extracelular, formación de biopelículas.	Wedage, Aberathne, Harischandra y Gunawardana (2019)
2	MC2	Acinetobacter calcoaceticus R1-1	98.57	Rizosfera	Biorremediación por degradación de hidrocarburos lineales. Cepa con cualidades PGPB en cultivos de maíz y pepino.	Pandey et al. 2016; Sanclemente, Yacumal y Patiño (2017)
3	MC3	Massilia phosphatilytica 12-OD1	95.63	Rizosfera	Solubiliza fosfatos	Zheng, Bi, Hao, Zhou y Yang (2017)
4	MC4	Acinetobacter baylyi PKS61	96.79	Rizosfera	Inocua, posee capacidad para degradar varios compuestos aromáticos y con potencial biotecnológico.	(Metzgar et al., 2004; Fischer, Bleichrodt y Gerischer, 2008; Santala et al., 2011)
6	MC6	Klebsiella sp. A8-KP4	96.57	Rizosfera	Fijadora de N ₂ y productora de sustancias reguladoras del crecimiento.	Carcaño-Montiel, Ferrera, Pérez, Molina y Bashan (2006)
7	MC9	Delfia tsuruhatensis AD1	99.04	Rizosfera	Cepa con características PGPB en cultivos de arroz y potencial agente de biocontrol contra patógenos de las plantas.	Han et al. (2005)
8	MC19	Pseudomonas putida JC186	99.50	Rizosfera	Producción de IAA, solubilización de fosforo inorgánico en trigo	Pang et al. (2016)
9	MC12	Ochrobactrum sp. KT49	95.55	Rizosfera	Tolerante a metales pesados, utilizada en biorremediación de aguas contaminadas, con cualidades PGPB.	Verma, Singh, Chowdhury y Tripathi (2004)
10	MC13	Stenotrophomonas maltophilia HH21	98.86	Rizosfera	Biorremediación de suelos/degradación de pesticidas	Estrada-Gamboa et al. (2023)
12	MC15	Pseudomonas putida TA7	98.02	Rizosfera	Cualidades PGPB con potencial aplicación industrial y medioambiental	Benedetti (2014 [†])
13	MC16-B	Stenotrophomonas maltophilia SW20	97.34	Rizosfera	Biodegradación de compuestos orgánicos y solubiliza fosfato	Morales-Guzman et al. (2020)
15	MC20	Pseudomonas taiwanensis GN1026	95.57	Rizosfera	Solubiliza fosfato	Torres-Rubio, Valencia, Bernal y Martínez (2000)
16	MC26	Comamonas terrigena MRHB1-156	96.58	Rizosfera	Biorremediación y tolerancia a metales pesados	Lau y Chang (2024)
17	MC23-A	Pseudomonas putida E13	97.68	Rizosfera	Aplicada en biodegradación de contaminantes ambientales y la síntesis de productos químicos de valor añadido (biocatálisis)	Kivisaar (2020)
18	MC25	Pseudomonas mediterranea S58	99.51	Rizosfera	Propiedades PGPB	Gu, Wang, Xia y Wei (2020)
1	F1A	Stenotrophomonas geniculata W10-6	99.47	Endosfera	Tolerante a metales pesados	Zhang, Song, Zhang y Wang (2024) y Wang et al. (2023)
2	F2B	Pantoea dispersa CHEN_B2	99.91	Endosfera	Propiedades PGPB	Yang, Yi y Xia (2023)
3	F3AR	Brucella pseudogrignonensis H324	98.19	Endosfera	Producción de sideróforos, movilización de fosforo y degradación de celulosa	Feigl et al. (2024)
4	F4B	Brucella pseudogrignonensis IILSFSC124	99.14	Endosfera	Producción de sideróforos, movilización de fosforo y degradación de celulosa	Feigl et al. (2024)
5	F6A	Brucella pseudogrignonensis IILSFSC124	99.14	Endosfera	Producción de sideróforos, movilización de fosforo y degradación de celulosa	Feigl et al. (2024)
6	F7B	Mycetocola reblochoni LMG 23020	99.79	Endosfera	Potencial biotecnológico en la producción de quesos	Bora et al. (2008)
7	N4	Pantoea vagans Y-4	100	Endosfera	Genes involucrados en la biosíntesis de carotenoides y terpenoides. Producción de A. giberélico, IAA y A. benzoico. Síntesis de rebaudiósido A	Simlat, Ptak, Jaglarz, Szewczyk, Dziurka y Gurgul (2023)

[†] Benedetti, I. (2014). *Design of standardized molecular tools to analyze regulatory properties and biotechnological applications of the soil bacterium Pseudomonas putida*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. Universidad de Madrid. Disponible en <http://hdl.handle.net/10486/664721>

[†] Benedetti, I. (2014). *Design of standardized molecular tools to analyze regulatory properties and biotechnological applications of the soil bacterium Pseudomonas putida*. Thesis for the degree of Doctor of Science. Autonomous University of Madrid. Available in <http://hdl.handle.net/10486/664721>

Carcaño-Montiel, Ferrera, Pérez, Molina y Bashan, 2006; Pang *et al.*, 2016; Pandey, Pathak y Dave, 2016; Zheng, Bi, Hao, Zhou y Yang, 2017; Wedage, Aberathne, Harischandra y Gunawardana, 2019; Morales-Guzmán *et al.*, 2020; Lau y Chang, 2024). Además, se ha reportado que algunas de estas bacterias han sido empleadas en procesos de biorremediación y biodegradación de contaminantes ambientales y compuestos orgánicos, destacando su potencial aplicabilidad en contextos industriales y medioambientales (Cuadro 3) (Verma, Singh, Chowdhury y Tripathi, 2004; Pandey *et al.*, 2016; Sanclemente, Yacumal y Patiño, 2017).

Para las cepas bacterianas aisladas de la endosfera se identificaron cuatro géneros distintos: *Stenotrophomonas*, *Pantoea*, *Brucella* y *Mycetocola*. Estos géneros han sido asociados previamente con características relevantes PGPB. Entre las funciones destacadas se incluye la producción de sideróforos, la tolerancia a metales pesados con aplicaciones en fitorremediación, la movilización de fósforo y la degradación de celulosa (Morales-Guzmán *et al.*, 2020; Estrada-Gamboa, Umaña, Sancho y Orozco, 2023; Kumar *et al.*, 2023; Feigl *et al.*, 2024). Además, se ha informado sobre su capacidad para sintetizar hormonas vegetales, tales como el ácido giberélico, el ácido indolacético (IAA) y el ácido benzoico, contribuyendo así a la promoción del crecimiento y desarrollo de las plantas hospederas (Cuadro 3) (Simlat, Ptak, Jaglarz, Szewczyk, Dziurka y Gurgul, 2023; Yang, Yi y Xia, 2023).

Con respecto a la frecuencia de los aislados, destaca la presencia de dos grupos, *Pseudomonas* y *Stenotrophomonas*, con mayor abundancia, cuyas cualidades biológicas destacan la capacidad de producir algunos metabolitos que favorecen a la planta bajo diferentes condiciones de estrés biótico y abiótico, tolerancia a metales pesados, presentar actividades de promoción de crecimiento vegetal como fijación de nitrógeno, solubilizar fosfatos, además, de la eficacia en la inoculación de las semillas para aumentar el rendimiento de granos de maíz (Lizárraga-Sánchez, Leyva, Sánchez, Quiroz y Maldonado, 2015).

Los resultados de la prueba de reducción de acetileno, solubilización de fosfato y producción de sideróforos se presentan en el Cuadro 4. De las 46 cepas aisladas, ocho mostraron capacidad para la fijación biológica de nitrógeno, diez evidenciaron halos de solubilización de fosfato tras cinco días de inoculación, y 17 cepas demostraron capacidad para la producción de sideróforos. Dentro de estas cepas, las que pertenecen a los géneros *Klebsiella*, *Pantoea* y *Brucella* mostraron resultados positivos en las tres pruebas realizadas, lo que sugiere una capacidad multifuncional como promotoras del crecimiento vegetal.

Los géneros *Pantoea* y *Klebsiella* han sido estudiados ampliamente por su rol en la promoción del crecimiento de las plantas, atribuible principalmente a su capacidad para fijar nitrógeno y producir sideróforos. Estas bacterias también pueden solubilizar fosfatos, contribuyendo a una mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas hospedadoras (Rana *et al.*, 2020; Duran-Bedolla, Garza, Rodríguez, Aguilar y Barrios, 2021; Sharma, Gang, Schumacher, Buck y Saraf, 2021; Timofeeva, Galyamova y Sedykh, 2023). Por otro lado, el género *Brucella*, aunque mayormente conocida como patógeno animal, incluye cepas que han demostrado ser beneficiosas para las plantas al promover su crecimiento mediante la fijación de nitrógeno y la producción de sideróforos (Khanna, Raj, Kumar y Wati, 2022; Sun, Shahrajabian y Soleymani, 2024).

De igual manera, las bacterias del género *Pseudomonas* exhibieron la capacidad de producir sideróforos y solubilizar fosfatos. Aunque no mostraron capacidad para fijar nitrógeno, su habilidad para aumentar la disponibilidad de nutrientes esenciales en el suelo las convierte en posibles candidatas para mejorar la salud y el rendimiento de los cultivos (Li *et al.*, 2017; Timofeeva *et al.*, 2023). Además, los géneros *Massilia*, *Mycetocola* y *Stenotrophomonas* demostraron la capacidad de producir sideróforos y fijar nitrógeno (Ryan *et al.*, 2009; Ghosh, Chatterjee y Mandal, 2020; Peta, Raths y Bücking, 2021; Tuesta-Popolizio, Velázquez, Rodríguez y Contreras, 2021; Kumar *et al.*, 2023; Martins *et al.*, 2024). Esta combinación de habilidades puede contribuir significativamente a la mejora de la disponibilidad de nutrientes para las plantas, incrementando así la productividad agrícola en diversos sistemas de cultivo.

Estos hallazgos subrayan la importancia de explorar y caracterizar cepas bacterianas con capacidades promotoras del crecimiento vegetal, para desarrollar estrategias biotecnológicas que optimicen el rendimiento agrícola sostenible. Es fundamental evitar el uso de géneros bacterianos relacionados con cepas patógenas, para asegurar la eficiencia en la promoción del crecimiento vegetal, la seguridad y salud de los cultivos, del medio ambiente y de los seres humanos (García-Fraile *et al.*, 2017; Flores-Félix *et al.*, 2024).

Cuadro 4. Resultados de las pruebas PGPB de las 46 cepas aisladas.
Table 4. Results of the PGPB assays for the 46 isolated strains.

Cepa	ARA*	SOL P β	SID°	Fuente de aislamiento
MC1	+	-	+	Rizosférico
MC2	-	+	-	Rizosférico
MC3	+	-	+	Rizosférico
MC4	-	+	-	Rizosférico
MC5	-	-	-	Rizosférico
MC6	+	+	+	Rizosférico
MC7	+	-	-	Rizosférico
MC9	-	-	+	Rizosférico
MC11	-	-	-	Rizosférico
MC12	-	-	-	Rizosférico
MC13	-	-	+	Rizosférico
MC14	-	-	-	Rizosférico
MC15	-	-	+	Rizosférico
MC16-A	-	-	-	Rizosférico
MC16-B	-	-	+	Rizosférico
MC17	-	-	+	Rizosférico
MC18	-	-	+	Rizosférico
MC19	-	+	+	Rizosférico
MC20	-	+	-	Rizosférico
MC21	-	-	-	Rizosférico
MC22	-	-	-	Rizosférico
MC23-A	-	+	+	Rizosférico
MC23-B	-	+	-	Rizosférico
MC24	-	-	-	Rizosférico
MC25	-	-	-	Rizosférico
MC26	-	-	+	Rizosférico
MC27	-	-	-	Rizosférico
MC28	-	-	-	Rizosférico
F1A	+	-	+	Endófito
F1B	-	-	-	Endófito
F2B	+	+	+	Endófito
F3A	-	-	-	Endófito
F3AR	-	-	-	Endófito
F3B	-	-	-	Endófito
F3BR	-	-	-	Endófito
F4A	-	-	-	Endófito
F4B	+	+	+	Endófito
F4C	-	-	-	Endófito
F5A	-	-	-	Endófito
F5B	-	-	-	Endófito
F6A	-	-	-	Endófito
F6B	-	-	-	Endófito
F7B	+	-	+	Endófito
N4	-	+	+	Endófito
N5A	-	-	-	Endófito
N5B	-	-	-	Endófito

+ = actividad positiva; - = actividad negativa. *ARA = prueba de reducción de acetileno; β SOL P = solubilización de fosfatos; °SID = Producción de sideróforos.
 + = positive activity; - = negative activity. *ARA = acetylene reduction assay; β SOL P = phosphate solubilization activity; °SID = siderophore production.

CONCLUSIONES

Los hallazgos obtenidos en este estudio revelan una notable diversidad de bacterias rizosféricas y endofíticas con potencial promotor del crecimiento vegetal (PGPB) en el cultivo de maíz en Chiapas, México. Las cepas aisladas mostraron capacidades relevantes, como la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fosfatos y la producción de sideróforos, lo que subraya su posible aplicación en la mejora de la nutrición vegetal y la sostenibilidad agrícola. Además, la caracterización genética mediante huellas genómicas ERIC-PCR y secuenciación del gen 16S rRNA permitió identificar una rica diversidad microbiana, destacando a los géneros *Klebsiella*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas* y *Stenotrophomonas* como los más prominentes. Estos resultados sugieren que las interacciones de estas bacterias con el maíz pueden desempeñar un papel crucial en la optimización del uso de nutrientes y en la promoción de un desarrollo más eficiente del cultivo. La diversidad microbiana observada y la capacidad multifuncional de algunas de las cepas aisladas, como aquellas del género *Klebsiella*, evidencian su potencial para futuras aplicaciones biotecnológicas en el diseño de bioinoculantes dirigidos a mejorar la sostenibilidad de los sistemas de producción de maíz. Este estudio aporta información valiosa sobre la microbiota asociada al maíz y contribuye en el estudio para el futuro desarrollo de estrategias de biofertilización más eficientes y específicas. Por último, es importante mencionar que, antes de considerar la aplicación de algunas cepas bacterianas como biofertilizantes, es crucial comprobar su naturaleza y asegurar su seguridad y eficacia. Este proceso implica realizar estudios exhaustivos para determinar no solo su capacidad para promover el crecimiento vegetal, sino también su inocuidad para las plantas, el suelo, y el medio ambiente.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Proyecto financiado por TecNM: No. 19414.24-P y No. 19337.24-P.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: A.G.J. y R.R.R. Metodología: J.C.M.G., E.F.S.M. y S.S.Z. Software: L.A.M.G. Validación: C.I.R.M. y J.C.M.G. Análisis formal: L.A.M.G. Investigación: E.F.S.M., S.S.Z. y J.C.M.G. Recursos, R.R.R. Curación de datos: C.I.R.M. y L.A.M.G. Escritura, preparación del borrador original: A.G.J. J.C.M.G. Escritura, revisión y edición: C.I.R.M. y A.G.J. Visualización: E.F.S.M. y S.S.Z. Supervisión: R.R.R. Administración del proyecto: R.R.R. Adquisición de fondos: R.R.R. Autores que contribuyeron por igual en este artículo: A.G.J. y E.F.S.M.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a CONAHCYT por la beca otorgada a A.G.J. (957344), L.A.M.G. (569862) y C.I.R.M. (597160). A Dra. Esperanza Martínez-Romero y Dr. Marco Antonio Rogel-Hernández por el apoyo y asesoría técnica para determinación ARA. A Tecnológico Nacional de México Campus Tuxtla Gutiérrez por la facilidad e infraestructura adecuada para realizar investigaciones.

LITERATURA CITADA

- Agunbiade, V. F., Fadiji, A. E., Agbodjato, N. A., & Babalola, O. O. (2024). Isolation and characterization of plant-growth-promoting, drought-tolerant rhizobacteria for improved maize productivity. *Plants*, 13(10), 1-27. <https://doi.org/10.3390/plants13101298>
- Ankenbauer, K. J., & Loheide, S. P. (2017). The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA. *Hydrological Processes*, 31(4), 891-901. <https://doi.org/10.1002/hyp.11070>
- Appel, C., Ma, L. Q., Rhue, R. D., & Reve, W. (2003). Selectivities of potassium-calcium and potassium-lead exchange in two tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 67(6), 1707-1714. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1707>
- Baldani, J. I., Reis, V. M., Videira, S. S., Boddey, L. H., & Baldani, V. L. D. (2014). The art of isolating nitrogen-fixing bacteria from non-leguminous plants using N-free semi-solid media: a practical guide for microbiologists. *Plant and Soil*, 384, 413-431. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2186-6>
- Bora, N., Vancanneyt, M., Gelsomino, R., Snauwaert, C., Swings, J., Jones, A. L., ... & Goodfellow, M. (2008). Mycetocola reblochoni sp. nov., isolated from the surface microbial flora of Reblochon cheese. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58(12), 2687-2693. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.64201-0>
- Carcaño-Montiel, M. G., Ferrera-Cerrato, R., Pérez-Moreno, J., Molina-Galán, J. D., & Bashan, Y. (2006). Actividad nitrogenasa, producción de fitohormonas, sideróforos y antibiosis en cepas de *Azospirillum* y *Klebsiella* aisladas de maíz y teocintle. *Terra Latinoamericana*, 24(4), 493-502.
- Clemensson-Lindell, A., & Persson, H., (1992). Effects of freezing on rhizosphere and root nutrient content using two soil sampling methods. *Plant and Soil*, 139, 39-45. <https://doi.org/10.1007/BF00012840>
- De Souza, R., Ambrosini, A., & Passaglia, L.M. (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology*, 38(4), 401-419. <https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>
- Döbereiner, J., Reis, V. M., Paula, M. A., & Olivares, F. D. (1993). Endophytic diazotrophs in sugar cane, cereals and tuber plants. In R. Palacios, J. Mora, W. E. Newton, (Eds.). *New Horizons in Nitrogen Fixation* (pp. 671-676). Dordrecht, Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2416-6_55
- Duran-Bedolla, J., Garza-Ramos, U., Rodríguez-Medina, N., Aguilar-Vera, A., & Barrios-Camacho, H. (2021). Exploring the environmental traits and applications of *Klebsiella* variicola. *Brazilian Journal of Microbiology*, 52, 2233-2245. <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00630-z>
- Ercole, T. G., Savi, D. C., Adamoski, D., Kava, V. M., Hungria, M., & Galli-Terasawa, L. V. (2021). Diversity of maize (*Zea mays* L.) rhizobacteria with potential to promote plant growth. *Brazilian Journal of Microbiology*, 52(4), 1807-1823. <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00596-y>
- Estrada-Gamboa, J., Umaña-Castro, R., Sancho-Blanco, C., & Orozco-Aceves, M. (2023). Aislamiento, identificación y caracterización de cepas bacterianas con potencial de degradación de los pesticidas clorotalonil y clorpirifos. *Uniciencia*, 37(1), 481-496. <https://doi.org/10.15359/ru.37-1.26>
- Fageria, N. K. (2012). Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(16), 2063-2113. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.697234>
- Fathi, A. (2022). Role of nitrogen (N) in plant growth, photosynthesis pigments, and N use efficiency. *Agrisost*, 28, 1-8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7143588>
- Fathi, A., & Afra, J. M. (2023). Plant Growth and Development in Relation to Phosphorus: A review. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*, 80(1), 1-7. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:2022.0012>
- Fernández, L., Castaño, C., García, P., Saran, A., Lorda, G., & Merini, L. (2023). Isolation and characterization of plant growth promoting bacteria (PGPB) from *Larrea divaricata* Cav., with potential use in phytoremediation of mining soils. *Environmental Sustainability*, 6(2), 271-281. <https://doi.org/10.1007/s42398-023-00272-x>
- Feigl, V., Medgyes-Horváth, A., Kari, A., Török, Á., Bombolya, N., Berkl, Z., & Fekete-Kertész, I. (2024). The potential of Hungarian bauxite residue isolates for biotechnological applications. *Biotechnology Reports*, 41, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2023.e00825>
- Fischer, R., Bleichrodt, F. S., & Gerischer, U. C. (2008). Aromatic degradative pathways in *Acinetobacter baylyi* underlie carbon catabolite repression. *Microbiology*, 154(10), 1-9. <https://doi.org/10.1099/mic.0.2008/016907-0>
- Flores-Félix, J. D., Gonçalves, A. C., Meirinho, S., Nunes, A. R., Alves, G., Garcia-Viguera, C., ... & Silva, L. R. (2024). Differential response of blueberry to the application of bacterial inoculants to improve yield, organoleptic qualities and concentration of bioactive compounds. *Microbiological Research*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127544>
- Gamalero, E., Bona, E., & Glick, B. R. (2022). Current techniques to study beneficial plant-microbe interactions. *Microorganisms*, 10(7), 1-40. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10071380>
- García-Fraile, P., Menéndez, E., Celador-Lera, L., Díez-Méndez, A., Jiménez-Gómez, A., Marcos-García, M., ... & Rivas, R. (2017). Bacterial Probiotics: A Truly Green Revolution. In V. Kumar, M. Kumar, S. Sharma, R. Prasad, (Eds.). *Probiotics and Plant Health* (pp. 131-162). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3473-2_6
- Gen-Jimenez, A., Flores-Félix, J. D., Rincón-Molina, C. I., Manzano-Gómez, L. A., Rogel, M. A., Ruíz-Valdiviezo, V. M., ... & Rincón-Rosales, R. (2023). Enhance of tomato production and induction of changes on the organic profiles mediated by *Rhizobium* biofortification. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1235930>
- Ghosh, R., Chatterjee, S., & Mandal, N. C. (2020). *Stenotrophomonas*. Beneficial Microbes In N. Amaran, M. Senthil Kumar, K. Annapurna, A. Krishna Kumar, Sankaranarayanan, (Eds.). *Beneficial Microbes in Agro-Ecology* (pp. 427-442). India: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823414-3.00020-4>
- Gómez, R. C., Iñiguez, P. C., Báez, W. L., Sánchez, J. M., Pereyra, R. C., Hernández, F. G., ... & Flores, R. A. (2022). Effect of the application of potassium on the yield of corn (*zea mays* L.) in La Frailesca, chiapas Mexico. *Brazilian Journal of Development*, 8(4), 29335-29343. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-430>
- Gu, Y., Wang, J., Xia, Z., & Wei, H. L. (2020). Characterization of a versatile plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas mediterranea* strain S58. *Microorganisms*, 8(3), 334. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8030334>
- Gupta, U. C., Kening, W. U., & Liang, S. (2008). Micronutrients in soils, crops, and livestock. *Earth Science Frontiers*, 15(5), 110-125. [https://doi.org/10.1016/S1872-5791\(09\)60003-8](https://doi.org/10.1016/S1872-5791(09)60003-8)
- Han, J., Sun, L., Dong, X., Cai, Z., Sun, X., Yang, H., ... & Song, W. (2005). Characterization of a novel plant growth-promoting bacteria strain Delftia tsuruhatensis HR4 both as a diazotroph and a potential biocontrol agent against various plant pathogens. *Systematic and Applied Microbiology*, 28(1), <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2004.09.003>
- Havlin, J. L. (2020). *Soil: Fertility and nutrient management*. In Y. Wang (Ed.). *Landscape and land capacity* (pp. 456). Boca Ratón, FL, USA: CRC Press. ISBN: 9780429445552

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2021). Climatología. Consultado el 23 de marzo, 2024, desde <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=07012#collapse-Mapas>
- Islam, M., Siddique, K. H., Padhye, L. P., Pang, J., Solaiman, Z. M., Hou, D., & Bolan, N. (2024). A critical review of soil phosphorus dynamics and biogeochemical processes for unlocking soil phosphorus reserves. *Advances in Agronomy*, 185, 153-249. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.02.004>
- Khanna, A., Raj, K., Kumar, P., & Wati, L. (2022). Antagonistic and growth-promoting potential of multifarious bacterial endophytes against Fusarium wilt of chickpea. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 32(17), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s41938-022-00516-8>
- Kirsten, M., Mikutta, R., Vogel, C., Thompson, A., Mueller, C. W., Kimaro, D. N., ... & Kalbitz, K. (2021). Iron oxides and aluminous clays selectively control soil carbon storage and stability in the humid tropics. *Scientific Reports*, 11(5076), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84777-7>
- Kivisaar, M. (2020). Narrative of a versatile and adept species *Pseudomonas putida*. *Journal of Medical Microbiology*, 69(3), 324-338. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.001137>
- Kong, Z., Wu, Z., Glick, B. R., He, S., Huang, C., & Wu, L. (2019). Co-occurrence patterns of microbial communities affected by inoculants of plant growth-promoting bacteria during phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109504>
- Kumar, A., Rithesh, L., Kumar, V., Raghuvanshi, N., Chaudhary, K., Abhineet, & Pandey, A. K. (2023). Stenotrophomonas in diversified cropping systems: friend or foe? *Frontiers in Microbiology*, 14, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1214680>
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
- Lau, S. H., & Chang, Y. T. (2024). Selective biodegradation of octylphenol polyethoxylates with different ethoxylate length chains by aerobic bacterial culture. *Chemosphere*, 361, 142538. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142538>
- León-Nájera, J. A., Gómez-Álvarez, R., Hernández-Daumás, S., Álvarez-Solís, J. D., & Palma-López, D. J. (2006). Mineralización en suelos con incorporación de residuos orgánicos en los altos de Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 22(2), 1-12. <https://doi.org/10.19136/era.a22n2.319>
- Li, H., Singh, R. K., Singh, P., Song, Q., Xing, Y., Yang, L., & Li, Y. (2017). Genetic diversity of nitrogen-fixing and plant growth promoting pseudomonas species isolated from sugarcane rhizosphere. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1-20. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01268>
- Lizárraga-Sánchez, G. J., Leyva-Madriral, K. Y., Sánchez-Peña, P., Quiroz-Figueroa, F. R., & Maldonado-Mendoza, I. E. (2015). *Bacillus cereus* sensu lato strain B25 controls maize stalk and ear rot in Sinaloa, Mexico. *Field Crops Research*, 176, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.02.015>
- López-Fuentes, E., Ruiz-Valdiviezo, V. M., Martínez-Romero, E., Gutiérrez-Miceli, F. A., Dendooven, L., & Rincon-Rosales, R. (2012). Bacterial community in the roots and rhizosphere of *Hypericum silenoides* Juss. 1804. *African Journal of Microbiology Research*, 6(11), 2704-2711. <https://doi.org/10.5897/AJMR11.1192>
- Ma, L., Jiang, X., Liu, G., Yao, L., Liu, W., Pan, Y., & Zuo, Y. (2020). Environmental factors and microbial diversity and abundance jointly regulate soil nitrogen and carbon biogeochemical processes in Tibetan wetlands. *Environmental Science & Technology*, 54(6), 3267-3277. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06716>
- Maldonado-Mendoza, I. E., & Morales-Ruiz, E. (2021). Bacterias del maíz como aliadas en la producción agroecológica de alimentos. *Revista Digital Universitaria*, 22(4), 1-8. <https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2021.22.4.2>
- Martínez-Soto, R. A., Yáñez-Díaz, M. I., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., & Marmolejo-Moncicaís, J.G. (2022). Effects of different land-use systems on soil physicochemical properties of a chernozem in northeast México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(3), 1-15. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.4115>
- Martins, B. R., Radl, V., Treder, K., Michałowska, D., Pritsch, K., & Schloter, M. (2024) The rhizosphere microbiome of 51 potato cultivars with diverse plant growth characteristics. *FEMS Microbiology Ecology*, 100(8), 1-16. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiae088>
- Mendoza, R. B., & Espinoza, A. (2017). *Guía técnica para muestreo de suelos*. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services (CRS).
- Metzgar, D., Bacher, J. M., Pezo, V., Reader, J., Döring, V., Schimmel, P., ... & de Crécy-Lagard, V. (2004). *Acinetobacter* sp. ADP1: an ideal model organism for genetic analysis and genome engineering. *Nucleic Acids Research*, 32(19), 5780-5790. <https://doi.org/10.1093/nar/gkh881>
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 39-47. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>
- Morales-Guzman, G., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R., Rivera-Cruz, M. D. C., Torres-Bustillos, L. G., & Mendoza-López, M. (2020). Effect of emulsifying bacteria on phytotoxicity attenuation of soils contaminated with weathered petroleum hydrocarbons. *Revista de Biología Tropical*, 68(2), 692-703. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i2.39327>
- Osman, K. T. (2013). Chemical properties of soil. In *Soils, Principles, Properties and Management*. The Netherlands: Springer.
- Pandey, P., Pathak, H., & Dave, S. (2016). Microbial ecology of hydrocarbon degradation in the soil: a review. *Research Journal of Environmental Toxicology*, 10(1), 1-15.
- Pang, F., Wang, T., Zhao, C., Tao, A., Yu, Z., Huang, S., & Yu, G. (2016). Novel bacterial endophytes isolated from winter wheat plants as biocontrol agent against stripe rust of wheat. *BioControl* 61, 207-219. <https://doi.org/10.1007/s10526-015-9708-x>
- Pereira, P., Nesci, A., & Etcheverry, M. G. (2009). Efficacy of bacterial seed treatments for the control of *Fusarium verticillioides* in maize. *BioControl*, 54, 103-111. <https://doi.org/10.1007/s10526-007-9148-3>
- Peta, V., Raths, R., & Bücking, H. (2021). *Massilia horti* sp. nov. and *Noviherbaspirillum arenae* sp. nov., two novel soil bacteria of the Oxalobacteraceae. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 71(5), 1-10. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004765>
- Ramakrishna, W., Yadav, R., & Li, K. (2019) Plant growth promoting bacteria in agriculture: Two sides of a coin, *Applied Soil Ecology*, 138, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.019>
- Rana, K. L., Kour, D., Kaur, T., Devi, R., Yadav, A. N., Yadav, N., ... & Saxena, A. K. (2020). Endophytic microbes: biodiversity, plant growth-promoting mechanisms and potential applications for agricultural sustainability. *Antonie van Leeuwenhoek*, 113, 1075-1107. <https://doi.org/10.1007/s10482-020-01429-y>
- Rakhsh, F., Golchin, A., Al Agha, A. B., & Alamdari, P. (2017). Effects of exchangeable cations, mineralogy and clay content on the mineralization of plant residue carbon. *Geoderma*, 307, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.010>
- Riaz, M. U., Ayub, M. A., Khalid, H., ul Haq, M. A., Rasul, A., ur Rehman, M. Z., & Ali, S. (2020). Fate of micronutrients in alkaline soils. In S. Kumar, R. S. Meena, M. K. Jhariya, (Eds.). *Resources are used efficiently in agriculture* (pp. 577-613). Singapore: Springer.

- Rincón-Molina, C. I., Hernández-García, J. A., Rincón-Rosales, R., Gutiérrez-Miceli, F. A., Ramírez-Villanueva, D. A., González-Terreros, E., & Ruíz-Valdiviezo, V. M. (2019). Structure and diversity of the bacterial communities in the acid and thermophilic crater-lake of the volcano El Chichón, Mexico. *Geomicrobiology Journal*, 36(2), 97-109.
- Rincón-Molina, C. I., Martínez-Romero, E., Ruíz-Valdiviezo, V. M., Velázquez, E., Ruiz-Lau, N., Rogel-Hernández, M. A., ... & Rincón-Rosales, R. (2020). Plant growth-promoting potential of bacteria associated to pioneer plants from an active volcanic site of Chiapas (Mexico). *Applied Soil Ecology*, 146, 103390. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103390>
- Rincón-Molina, C. I., Martínez-Romero, E., Aguirre-Noyola, J. L., Manzano-Gómez, L. A., Zenteno-Rojas, A., Rogel, M. A., ... & Rincón-Rosales, R. (2022). Bacterial community with plant growth-promoting potential associated to pioneer plants from an active Mexican volcanic complex. *Microorganismos*, 10(8), 1-22. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081568>
- Rincón-Rosales, R., Lloret, L., Ponce, E., & Martínez-Romero, E. (2009). Rhizobia with different symbiotic efficiencies nodulate *Acaciella angustissima* in Mexico, including *Sinorhizobium chiapanecum* sp. nov. which has common symbiotic genes with *Sinorhizobium mexicanum*. *FEMS Microbiology Ecology*, 67(1), 103-117. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00590.x>
- Rodríguez-Hernández, M. G., Gallegos-Robles, M. Á., Rodríguez-Sifuentes, L., Fortis-Hernández, M., Luna-Ortega, J. G., & González-Salas, U. (2020). Cepas nativas de *Bacillus* spp. como una alternativa sostenible en el rendimiento de forraje de maíz. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 313-321. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.690>
- Ryan, R. P., Monchy, S., Cardinale, M., Taghavi, S., Crossman, L., Avison, M. B., Berg, G., ... & Dow, J. M. (2009). The versatility and adaptation of bacteria from the genus *Stenotrophomonas*. *Nature Reviews Microbiology*, 7, 514-525. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2163>
- Saad, M. M., Kandil, M., & Mohammed, Y. M. (2020). Isolation and identification of plant growth-promoting bacteria are highly effective in suppressing root rot in fava beans. *Current Microbiology*, 77, 2155-2165. <https://doi.org/10.1007/s00284-020-02015-1>
- Sanclemente, O., Yacumal, V., & Patiño, C. (2017). Solubilización de fosfatos por bacterias nativas aisladas en tres agroecosistemas del Valle del Cauca (Colombia). *Temas Agrarios*, 22(2), 61-69. <https://doi.org/10.21897/rta.v22i2.945>
- Santala, S., Efimova, E., Kivinen, V., Larjo, A., Aho, T., Karp, M., & Santala, V. (2011). Improved Triacylglycerol Production in *Acinetobacter baylyi* ADP1 by Metabolic Engineering. *Microbial Cell Factories*, 10(36), 1-10. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-10-36>
- Schafer, J. R., Hallett, S. G., & Johnson, W. G. (2014). Rhizosphere microbial community dynamics in glyphosate-treated susceptible and resistant biotypes of giant ragweed (*Ambrosia trifida*). *Weed Science*, 62(2), 370-381. <https://doi.org/10.1614/WS-D-13-00164.1>
- Schwyn, B., & Neilands, J. B. (1987). Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Analytical Biochemistry*, 160(1), 47-56. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(87\)90612-9](https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90612-9)
- Sharma, S., Gang, S., Schumacher, J., Buck, M., & Saraf, M. (2021). Genomic appraisal of *Klebsiella* PGPB isolated from soil to enhance the growth of barley. *Genes and Genomics*, 43, 869-883. <https://doi.org/10.1007/s13258-021-01099-8>
- Simlat, M., Ptak, A., Jaglarz, A., Szewczyk, A., Dziurka, M., & Gurgul, A. (2023). Seeds of *Stevia rebaudiana* Bertoni as a Source of Plant Growth-Promoting Endophytic Bacteria with the Potential to Synthesize Rebaudioside A. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), 1-20. <https://doi.org/10.3390/ijms24032174>
- Sun, W., Shahrajabian, M. H., & Soleymani, A. (2024). The Roles of Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR)-Based Biostimulants for Agricultural Production Systems. *Plants*, 13(5), 613. <https://doi.org/10.3390/plants13050613>
- Timofeeva, A. M., Galyamova, M. R., & Sedykh, S. E. (2023). Plant Growth-Promoting Soil Bacteria: Nitrogen Fixation, Phosphate Solubilization, Siderophore Production, and Other Biological Activities. *Plants*, 12, 4074. <https://doi.org/10.3390/plants12244074>
- Torres-Rubio, M. G., Valencia-Plata, S. A., Bernal-Castillo, J., & Martínez-Nieto, P. (2000). Isolation of Enterobacteria, *Azotobacter* sp. and *Pseudomonas* sp., producers of indole-3-acetic acid and siderophores, from Colombian rice rhizosphere. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42(4), 171-176.
- Tuesta-Popolizio, D. A., Velázquez-Fernández, J. B., Rodríguez-Campos, J., & Contreras-Ramos, S. M. (2021). Isolation and identification of extremophilic bacteria with potential as plant growth promoters (PGPB) of a geothermal site: a case study. *Geomicrobiology Journal*, 38(5), 436-450. <https://doi.org/10.1080/01490451.2021.1879972>
- USGS (United States Geological Survey). (2024). Earth Explorer: Geographic coordinates of 16° 48' 16.1" N, 93° 22' 13.0" O. Consultado el 23 de febrero, 2024, desde <https://earthexplorer.usgs.gov>
- Verma, S. C., Singh, A., Chowdhury, S. P., & Tripathi, A. K. (2004). Endophytic colonization ability of two deep-water rice endophytes, *Pantoea* sp. and *Ochrobactrum* sp. using green fluorescent protein reporter. *Biotechnology Letters*, 26, 425-429. <https://doi.org/10.1023/B:BILE.0000018263.94440.ab>
- Versalovic, J., Koeuth, T., & Lupski, J. R. (1991). Distribution of repetitive DNA sequences in eubacteria and application to fingerprinting of bacterial genomes. *Nucleic Acid Research*, 19(24), 6823-6831. <https://doi.org/10.1093/nar/19.24.6823>
- Wang, Y., Luo, X., Chu, P., Shi, H., Wang, R., Li, J., & Zheng, S. (2023). Cultivation and application of nicotine-degrading bacteria and environmental functioning in tobacco planting soil. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00630-x>
- Weber, O. B., Baldani, V. L. D., Teixeira, K. D. S., Kirchhof, G., Baldani, J. I., & Döbereiner, J. (1999). Isolation and characterization of diazotrophic bacteria from banana and pineapple plants. *Plant and Soil*, 210(1), 103-113.
- Wedage, W. M. M., Aberathne, A. H. M. N. R., Harischandra, I. N., & Gunawardana, D. (2019). A Nodulation-Proficient Nonrhizobial Inhabitant of *Pueraria phaseoloides*. *The Scientific World Journal*, 1, 9782684. <https://doi.org/10.1155/2019/9782684>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., ... & Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 629. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>
- Yang, W. T., Yi, J. J., & Xia, B. (2023). Unveiling the duality of *Pantoea dispersa*: a mini review. *Science of The Total Environment*, 873, 162320. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162320>
- Zhang, S., Song, M., Zhang, J., & Wang, H. (2024). Cysteine and thiosulfate promoted cadmium immobilization in strain G303 by the formation of extracellular CdS. *Science of The Total Environment*, 923, 171457. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171457>
- Zheng, B. X., Bi, Q. F., Hao, X. L., Zhou, G. W., & Yang, X. R. (2017). *Massilia phosphatilytica* sp. nov., a phosphate solubilizing bacteria isolated from a long-term fertilized soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 67(8), 2514-2519. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.001916>